

КОМБИНИРОВАННАЯ ГРАВИТАЦИОННО-ФЛОТАЦИОННАЯ ТЕХНОЛОГИЯ ОБОГАЩЕНИЯ ТЕХНОГЕННЫХ РОССЫПЕЙ ЗОЛОТА

© 2021 г. С.И. Евдокимов, Т.Е. Герасименко

Северо-Кавказский горно-металлургический институт (СКГМИ)
(государственный технологический университет), г. Владикавказ, Россия

Статья поступила в редакцию 25.10.20 г., доработана 06.12.20 г., подписана в печать 16.12.20 г.

Аннотация: При извлечении золота из отходов промывки россыпей использован способ флотации, при котором для повышения содержания извлекаемого металла в операции основной флотации используют оборотный черновой концентрат. При этом флотацию выполняют смесью воздуха с горячим водяным паром. В условиях паровоздушной флотации в первый момент времени в результате конденсации пара давление в пузырьках падает и их размер уменьшается. При сжатии пузырька теплообмен между фазами ухудшается, и при минимальном размере пузырька массообмен прекращается, а температура и давление пара в пузырьке достигают своего максимума. С ростом размера пузырька перегретый пар становится насыщенным, и давление в пузырьке уменьшается, что ведет к возобновлению конденсации. Поверхность пузырька совершает затухающие колебания. При этом движение медленно развивающегося концентрационно-капиллярного потока Марангони к центру межфазной пленки не может компенсировать ее утончение встречным термокапиллярным потоком с большим потенциалом гидродинамической устойчивости от центра к периферии пленки. Полученные результаты флотации паровоздушной смесью могут быть интерпретированы в рамках этого механизма изменения устойчивости смачивающих пленок при фазовом переходе пар–жидкость. В работе проведены опытно-промышленные испытания гравитационной и гравитационно-флотационной технологий извлечения золота из его техногенной россыпи. Доказано, что основным эффектом от применения разработанной конфигурации схемы и режима флотации паровоздушной смесью является уменьшение выхода концентрата на ~25 % при сохранении достигнутого уровня извлечения и качества концентрата. При использовании комбинированной технологии добавленная стоимость товарной продукции обеспечивает повышение величины чистого дисконтированного дохода и индекса рентабельности инвестиций, а также снижение срока их окупаемости.

Ключевые слова: россыпь золота, гравитация, флотация, пузырьки пара, колебания стенок, механизм процесса, промышленные испытания, экономический результат.

Евдокимов С.И. — канд. техн. наук, доцент кафедры «Обогащение полезных ископаемых» СКГМИ (362048, РСО-Алания, г. Владикавказ, пр-т Доватора, 43). E-mail: eva-ser@mail.ru.

Герасименко Т.Е. — канд. техн. наук, начальник отдела интеллектуальной собственности СКГМИ. E-mail: gerasimenko_74@mail.ru.

Для цитирования: Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е. Комбинированная гравитационно-флотационная технология обогащения техногенных россыпей золота. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2021. Т. 27. № 4. С. 4–15. DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-4-4-15.

Combined gravitation-flotation technology for technogenic gold placer concentration

S.I. Evdokimov, T.E. Gerasimenko

North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University), Vladikavkaz, Russia

Received 25.10.2020, revised 06.12.2020, accepted for publication 16.12.2020

Abstract: Gold recovery from placer washing waste was carried out using a flotation method where circulating rough concentrate is used to increase the recovered metal content in the rougher flotation operation. Moreover, flotation is carried out with a mixture of air with hot steam. Pressure in bubbles drops and their sizes decrease as a result of vapor condensation at the first moment of time under conditions of vapor-air flotation. Heat exchange between the phases worsens when the bubble is compressed, and mass transfer stops at the minimum bubble size, while temperature and vapor pressure in the bubble reach their maximum. As the bubble grows in size, superheated steam becomes saturated and pressure in the bubble decreases resulting in resumed condensation. The bubble surface undergoes damped oscillations. When the bubble surface vibrates, the motion of a slowly developing concentration-capillary Marangoni flow to the center of the interphase film

cannot compensate for its thinning by the counter thermocapillary flow with a high hydrodynamic stability potential from the film center to its periphery. The vapor-air flotation results obtained can be interpreted in the context of this mechanism of wetting film stability changes during the vapor-liquid phase transition. Pilot tests of gravity and gravity-flotation technologies for gold extraction from a technogenic placer of gold have been carried out. It has been proved that the main effect of using the developed configuration of the scheme and the mode of flotation with a vapor-air mixture is a decrease in the concentrate yield by $\sim 25\%$ rel. while maintaining the achieved level of recovery and concentrate quality. When using the combined technology, the added value of marketable products provides an increase in the value of net discounted income and the return on investment index, and a decrease in their payback period.

Keywords: gold placer, gravity, flotation, steam bubbles, wall vibrations, process mechanism, industrial tests, economic result.

Evdokimov S.I. — Cand. Sci. (Eng.), Assistant prof., Department of mineral processing, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University) (362048, Russia, Vladikavkaz, Dovatora pr., 43). E-mail: eva-ser@mail.ru.

Gerasimenko T.E. — Cand. Sci. (Eng.), Head of Intellectual property department, North Caucasian Mining and Metallurgical Institute (State Technological University). E-mail: gerasimenko_74@mail.ru.

For citation: Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E. Combined gravitation-flotation technology for technogenic gold placer concentration. *Izvestiya Vuzov. Tsvetnaya Metallurgiya (Izvestiya. Non-Ferrous Metallurgy)*. 2021. Vol. 27. No. 4. P. 4–15 (In Russ.). DOI: dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2021-4-4-15.

Введение

При транспорте потоком воды золото высвобождается из коренных пород и за счет большой гидравлической крупности отстает от основного потока аллювия, формируя россыпь. При окатывании крупных зерен в ней образуется мелкое ($-0,25+0,1$ мм) и тонкое ($-0,1$ мм) золото (МТЗ). В зависимости от глубины залегания россыпи продуктивные пласты содержат от 40 % МТЗ (месторождения больших глубин рек Нюкжа, Б. Ольдой, Иликан и Гайфон в Приамурье) до 95 % МТЗ (вблизи поверхности рек Джалинда, Нагима, Желтулак-1, Уллучи и Некля).

Исходя из высокой плотности золота, сепарацию песков россыпей ведут с использованием шлюзовой технологии — обогащения в потоке воды на наклонной плоскости. Чешуйки и листочки золота толщиной 0,005 мм с линейными размерами $0,5 \times 0,2$ мм, имеющие большое гидродинамическое сопротивление и горизонтальную составляющую скорости, и минералы породы имеют близкие коэффициенты равнопадаемости. В скоростных (2–3 м/с) турбулентных потоках воды извлечение из песков россыпи золота такого «упорного морфотипа» [1] оказывается низким.

При доводке шлихов с повышенным содержанием МТЗ потери металла составляют $\sim 10\%$ и более. Для повышения извлечения МТЗ обогащение осуществляют в условиях действия центробежной силы (концентраторы типа Knelson и Falcon [2–4], центробежные отсадочные машины Kelsey), шлюзы доукомплектовывают концентрационными столами со сложными профилем и режимом движения деки (Gemini), а также винтовыми шлюза-

ми и сепараторами. Доводку шлихов с высоким содержанием МТЗ осуществляют в квазиутяжеленной ферромагнитной жидкости [5, 6] или методом пирометаллургии.

Однако количества золота, получаемого с применением этого высокотехнологичного оборудования из техногенных отходов с низкой извлекаемой ценностью, оказывается недостаточно для окупаемости капитальных затрат и эксплуатационных расходов в приемлемые для инвестора сроки.

В то же время в отходах россыпной золотодобычи сосредоточено 7–12 % прогнозных ресурсов и запасов золота РФ (4,0–4,5 тыс. т золота), ежегодная добыча золота из которых составляет $\sim 10\div 15\%$ от общего количества произведенного металла.

Таким образом, вовлечение в хозяйственный оборот отходов россыпной золотодобычи требует решения актуальной проблемы разработки технологии, обеспечивающей эффективное извлечение МТЗ с приемлемыми затратами.

Цель работы состояла в создании комбинированной гравитационно-флотационной технологии извлечения золота из россыпей и определении ее эффективности в условиях опытно-промышленной переработки техногенных отходов.

Материалы, технические и технологические разработки

Исследовательские испытания разработанной технологии выполнены на отходах освоения россыпного месторождения золота р. Харгу в Приамурье.

Для оценки содержания золота в эфельном отвале был заложен шурф. Из материала, отобранного из шурфа через каждые 0,1 м, сформировано 10 проб, из которых с применением отсадки (МОД-0,2М1), концентрации на столе (30АКЦ-М2), магнитной сепарации в слабом и сильном полях (СЭМ 138Т) с магнитожидкостным гравиметрическим окончанием (сепаратор с градиентом магнитного поля $(1,2 \div 3,5) \cdot 10^{12} \text{ А}^2/\text{м}^3$ в V-образной рабочей зоне из Nd—Fe—В-магнитов) выделяли тяжелые фракции.

Продукты разделения анализировали пробирным атомно-абсорбционным (эмиссионным) методом.

По данным проведенного опробования содержание золота в исходных эфелях составило 287,4 мг/м³.

С целью визуализации самородного золота, определения его гранулометрического состава и морфологических параметров из серых шлихов, выделенных при опробовании эфелей и в процессе их опытно-промышленной переработки, была составлена композитная проба. Ее подвергли концентрированию по схеме, включающей основную и перечистную операции, на концентративных столах Holman-800 и Gemini GT60. Из легкой фракции столов золото доизвлекали с применением центробежного концентратора Falcon SB40. Полученный черный шлик подвергли магнитному фракционированию: 1,0—1,5 % материала выделялось из шлика в слабом магнитном поле и еще 30—35 % — в сильном. Шлиховое золото выделяли расслоением немагнитной фракции в тяжелой жидкости (бромформе) и выборкой под бинокулярным микроскопом. В табл. 1 приведено распределение золота по классам крупности.

В каждом классе крупности было отобрано от 114 до 200 зерен золота и по их массе рассчитана средняя масса одной золотины (табл. 1).

С использованием данных табл. 1 определено содержание золота в исходных эфелях:

Масса пробы исходных эфелей, кг	93,1
Выход продуктивного	
класса крупности —2 мм, %	20,1
Извлечение золотин (знаков золота)	
из продуктивного класса крупности,	
всего, шт.	148
Суммарная масса извлеченных золотин, мг.....	53,9
Объемная масса исходных эфелей, т/м ³	2,47
Расчетное содержание золота	
в исходных эфелях:	
мг/т	130,4
мг/м ³	322,0

Таким образом, расчетное содержание золота в исходных эфелях составило 322,0 мг/м³.

В тяжелой фракции концентрационного стола Gemini GT60 примерно 90 % золота находится в свободной форме, остальное — в сростках с сульфидами (пирит, галенит) и минералами породы.

Мелкие зерна золота имеют кристаллическую, интерстициальную и чешуйчатую формы, а крупные представлены тонкими листочками и раскатанными пластинками ярко-желтого цвета с вишнево-синими разводами по рваным краям. Поверхность золотин преимущественно шероховатая, реже — шагреневая и со слабо выраженной рельефной поверхностью. Плотные образования из гидроксидов железа на поверхности зерен и глинистые — в углублениях рельефа поверхности, характерные для золота в лежалых отходах россыпной золотодобычи, отсутствуют.

Таблица 1. Гранулометрический состав золота в эфелях и расчетная масса зерен золота

Table 1. Grain-size distribution of gold in the fine-grained part of beneficiation tailings and calculated gold grain mass

Класс крупности, мкм	Число зерен, шт.	Распределение, %	Число зерен в навеске, шт.	Масса навески, мг	Расчетная масса зерна, мг
—500+200	53	35,8	114	1062,748	9,322
—200+100	38	25,8	122	37,877	0,310
—100+74	33	22,3	143	10,057	0,077
—74+40	14	9,4	177	0,778	0,004
—40+0	10	6,7	200	0,470	>0,002
Всего:	148	100,0			

Отходы такого качества могут быть перспективным сырьем для извлечения золота флотацией [7]. Для их освоения в ООО «ГЕОС» (г. Владикавказ) совместно с ГПП «Амурзолоторазведка» (г. Свободный) разработана промывочная установка ПГШОК-50-2 [7] на основе гравитационных и флотационных методов обогащения.

Аппаратом первого приема в установке является шлюз-грохот, предназначенный для выделения при дезинтеграции эфелей материала крупностью +3 мм и удаления его в отвал. Материал крупностью –3 мм сгущают и обогащают на винтовых сепараторах. Предусмотрены основная и перечистная операции винтовой сепарации. Тяжелую фракцию винтовой сепарации перечищают на концентрационных столах. Из хвостов винтовой сепарации и концентрации на столах золото извлекают методом флотации.

В установке применены два новых технологических решения для увеличения количества извлекаемого металла в операции основной флотации и для аэрации пульпы. При каноническом построении схемы флотации требуемое (для высокого извлечения) повышение содержания металла достигают, направляя промпродукты из последующих операций в предыдущие. При такой конфигурации схемы происходит смешение однородных по вещественному признаку (по металлу, минералу), но неоднородных по флотационным свойствам материалов. Получается смесь с пониженной способностью к разделению: в ней присутствуют зерна золота, флотируемость которых изменяется от максимальной до минимальной. Прирост извлечения золота за счет увеличения его содержания оказывается меньше ожидаемого из-за высоких потерь зерен золота с пониженной флотируемостью.

Результат будет иным при повышении содержания ценного компонента в операции основной флотации путем смешения черного концентрата, выделенного из $1/2$ части исходного питания, с другой $1/2$ его частью [7]. Такое «предварительное обогащение» исходного питания обеспечивает увеличение извлечения, как и в случае удаления в отвал 20–30 % материала с пониженным содержанием извлекаемых металлов, в том числе золота, методом предварительной концентрации руд [8] на основе гравитационных и ядерно-физических разделительных признаков [9].

Для повышения эффективности разделения смеси исходного питания и черного концентрата разработан режим аэрации пульпы с тепловым

воздействием на газовую фазу. Частица прилипает к пузырьку при толщине разделяющей их межфазной пленки порядка 10–20 нм, при которой силы притяжения преобладают над силами отталкивания. Утончение смачивающей пленки до критических величин должно произойти в течение времени перемещения частицы по поверхности пузырька (в зависимости от характера столкновения — от 10^{-3} до 10^{-1} с). Перевод наноразмерной смачивающей пленки в метастабильное состояние можно осуществить кратковременным локальным тепловым воздействием на нее.

Для этой цели предлагается использовать теплоту конденсации водяного пара ($2260 \text{ кДж} \cdot \text{кг}^{-1}$) путем присадки к воздуху, поступающему на аэрацию пульпы, горячего ($>100^\circ\text{C}$) пара. Паровоздушный поток касательными напряжениями, вызванными турбулентными потоками пульпы, дробится на пузырьки, заполненные паром-аэрозолем. За счет разницы температур (пара и пульпы) пар конденсируется на межфазной границе газ–жидкость, температура которой в течение первых миллисекунд увеличивается практически до температуры пара.

При проектировании установки ПГШОК-50-2 и реализации способа флотации аэрозолем выбрана колонная флотационная машина с подачей паровоздушной смеси вынесенным боковым аэратором конфузор-диффузорного типа [7].

Результат разделения во флотационной колонне по сравнению с импеллерной флотомашинной лучше за счет [10]:

- меньшего времени пребывания частиц в рабочей зоне (как аппарата с идеальным вытеснением);
- высокой удельной производительности за счет увеличения эффективности и скорости subprocessов флотации;
- широкого диапазона крупности флотируемых минералов.

Для колонн разработаны диспергаторы, обеспечивающие получение и подачу аэрозоля с заданными свойствами (например, конфузор-диффузорного типа). При создании мобильных перерабатывающих комплексов (типа ПГШОК-50-2) важное значение имеют [7]:

- высокая удельная производительность за счет увеличения эффективности и скорости subprocessов флотации;
- большое значение заменяемого объема (1 : 0,4) при установке колонн;

— сокращение производственной площади до $0,08 \text{ м}^2/(\text{м}^3 \cdot \text{ч}^{-1})$;

— снижение эксплуатационных затрат за счет низкого расхода электроэнергии.

Товарным продуктом являются слитки сплава Доре. Для подготовки гравито- и флотоконцентрата к плавке изготовлен модуль доводки.

Источником переменного трехфазного электрического тока напряжением 0,4 кВ на промплощадке является дизельная электростанция ДЭС с ДГУ типа АД-100С-Т400 (100 кВт/125 кВА) на основе дизельного мотора ЯМЗ-238М2-45.

Теоретическая база способа флотации

При флотации нагрев смачивающей пленки может быть осуществлен за счет теплового потока со стороны жидкой фазы (при нагреве всего объема пульпы) и газовой фазы (при использовании для аэрации смеси воздуха и водяного пара).

Интенсивность фазового перехода зависит от способности веществ системы отводить и подводить тепло. Существенные различия значений коэффициентов теплоотдачи от границы раздела фаз к воде и ее пару [11, 12] обуславливают энергетическую эффективность применения для нагрева смачивающих пленок пара.

Поступление пузырьков воздуха, заполненных водяным паром, во флотомашину можно представить (рис. 1) как мгновенное удаление теплоизолирующей перегородки, разделяющей две фазы — сплошную (холодную воду) и газовую (смесь воз-

духа с горячим паром). За счет тепла конденсации в граничном слое пузырька толщиной $h_d \sim 4 \cdot 10^{-5} \text{ м}$ в течение $\tau = 1 \div 3 \text{ мс}$ между несущей жидкостью и паром в пузырьке устанавливается перепад температуры $2 \div 3 \text{ }^\circ\text{C}$ [13].

В начальный момент времени пар конденсируется, и размер пузырька уменьшается, а давление пара в нем остается исходным. С уменьшением размера пузырька (поверхности теплообмена) за счет теплопроводности жидкости отводится только часть тепла конденсации пара. Другая его часть идет на нагрев пара, что является причиной снижения интенсивности конденсации, увеличения давления и размера пузырька. Укрупнение пузырька способствует теплообмену между жидкостью и паром, нарастанию конденсации, уменьшению давления и возобновлению массообмена. За счет испарения несущей жидкости размер пузырька растет.

В соответствии с принятой моделью при конденсации и уменьшении размера пузырька (площади межфазного теплообмена) граница раздела фаз сдвигается в сторону пара. При достижении пузырьком минимального размера в граничный слой жидкости за счет теплоемкости отводится только часть теплового потока, а другая — затрачивается на испарение некоторого количества вещества, и пар перегревается. Граница раздела фаз сдвигается в сторону жидкости, и размер пузырька увеличивается. Фазовые переходы повторяются, т.е. стенка пузырька совершает радиальные колебания.

При совпадении частоты собственных колебаний стенок пузырьков с частотой колебаний за счет фазовых переходов сечение столкновения с осаждающимися частицами многократно увеличивается (рис. 2) [14–16].

При столкновении частицы с пузырьком их взаимное положение можно характеризовать (рис. 3, а) радиусами эффективных сечений соударения (l_1, l_2), углом вхождения частиц в диффузионный слой пузырька (θ_0) в момент времени $t = 0$ и углом θ_t , определяющим положение частицы в момент времени t . При этом адсорбция $\Gamma(\theta)$ распределяется на поверхности пузырька так, что $\Gamma[0, t(\theta)]$ — временная зависимость адсорбции в центре, а $\Gamma[a, t(\theta)]$ — на периферии межфазной пленки (рис. 3, б).

При растяжении—сжатии молекулы поверхностно-активного вещества (ПАВ) располагаются на пузырьке так, что при перемещении части-

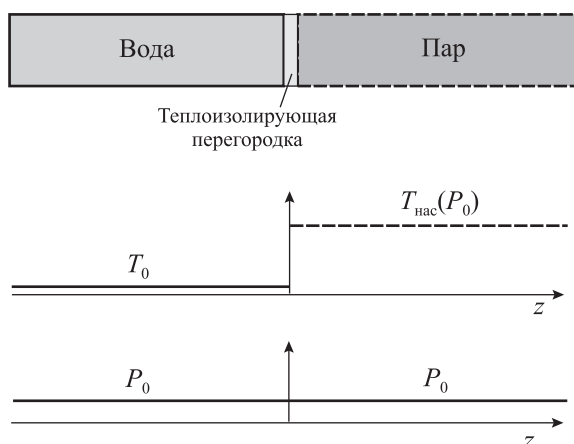


Рис. 1. Теплофизическое состояние на межфазной поверхности при барботировании жидкости аэрозолем в начальный момент времени

Fig. 1. Thermophysical state at phase interface during liquid barbotage by aerosol at an initial instant

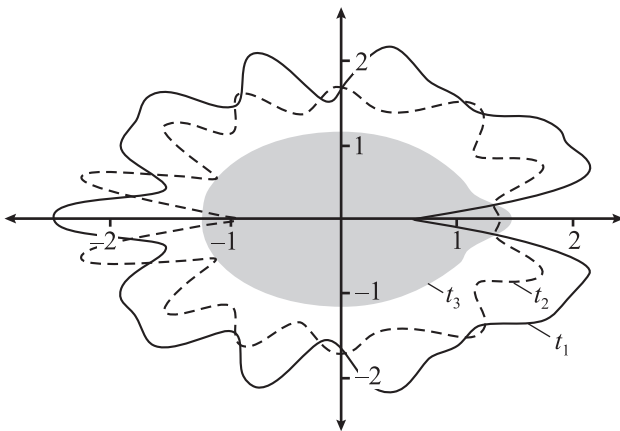


Рис. 2. Эволюция размера и контура пузырька по результатам моделирования тепломассообмена пара в пузырьке с холодной жидкостью в моменты относительного времени $t_1 < t_2 < t_3$

Fig. 2. Evolution of bubble size and contour according to vapor heat-and-mass transfer simulation results when in a bubble with cold liquid at relative times $t_1 < t_2 < t_3$

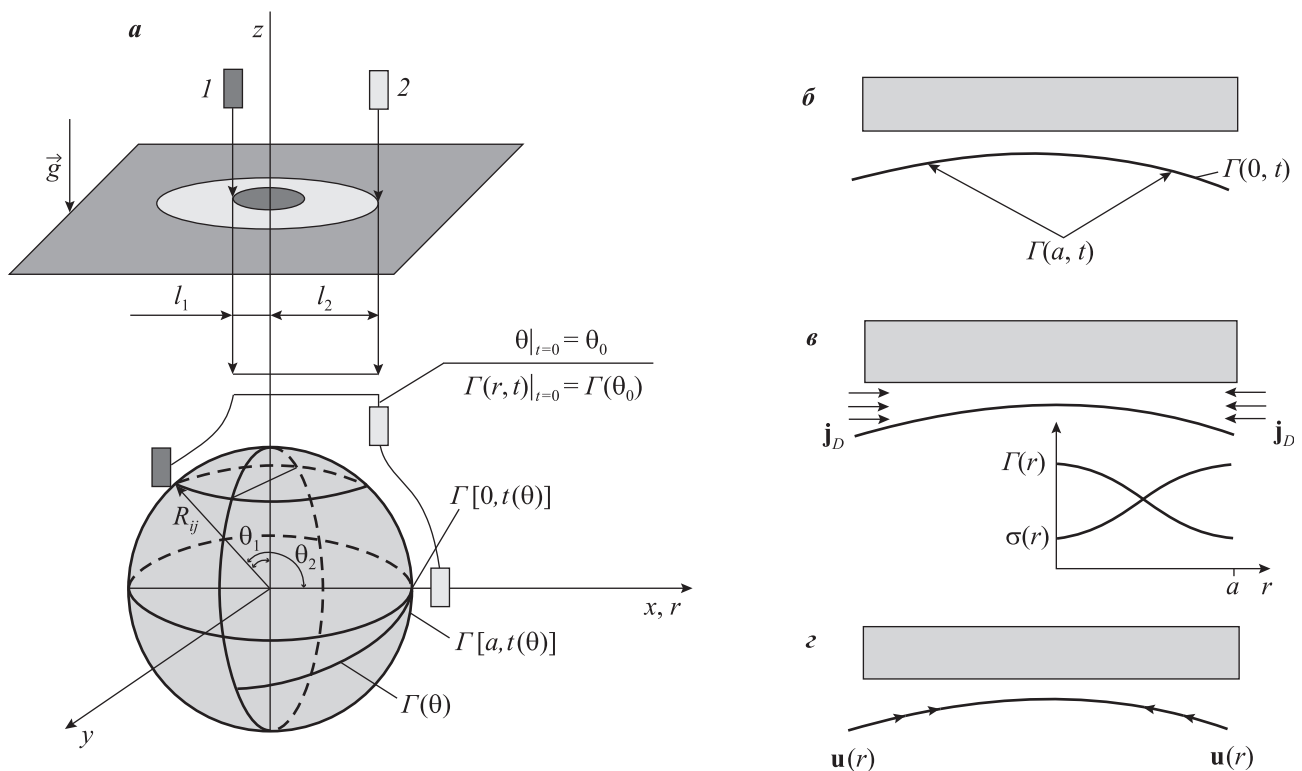


Рис. 3. Схема механизма стабилизации толщины межфазной пленки поверхностными течениями жидкости **а** – траектория движения пластинчатой частицы вдоль поверхности пузырька; **б** – значения адсорбции в межфазной пленке; **в** – распределение адсорбции и поверхностного натяжения вдоль межфазной пленки; **з** – распределение скорости вдоль поверхности пузырька

Fig. 3. Flowchart of interphase film thickness stabilization by surface liquid currents

а – plate-like particle movement path along the bubble surface; **б** – phase interface adsorption values; **в** – adsorption and surface tension distribution along the phase interphase; **з** – velocity distribution along the bubble surface

цы вдоль его поверхности концентрация молекул ПАВ в центре межфазной пленки неизменно ниже, чем на ее периферии (рис. 3) [17, 18]:

$$\Gamma(a, t) = \Gamma[\theta(t)] > \Gamma(\theta_1) = \Gamma(0, t),$$

где $\Gamma(0, t)$ и $\Gamma(a, t)$ – значения адсорбции в центре и на периферии межфазной пленки соответственно.

Втекание жидкости в межфазный зазор, стабилизирующее его толщину, характеризуют вектор диффузионного потока ПАВ \mathbf{j}_D (рис. 3, в) и распределение скорости $\mathbf{u}(r)$ вдоль всплывающего пузырька (рис. 3, з) под действием градиента поверхностного натяжения. В зависимости от расстояния r до центра межфазного зазора значения адсорбции $\Gamma(r)$ и поверхностного натяжения $\sigma(r)$ распределяются так, что в центре пленки величины $\Gamma(r)$ и $\sigma(r)$ приобретают свои средние значения.

Следствием фазовых переходов в пузырьке пара и неравномерного распределения концентрации ПАВ вдоль поверхности пузырька является

появление термокапиллярного и концентрационно-капиллярного течений [17, 18], которые можно оценить величиной температурного и диффузионного числа Марангони:

$$Ma_T = \frac{h^2}{\eta\chi} \frac{\partial\sigma}{\partial T} \nabla T,$$

$$Ma_C = \frac{h^2}{D\eta} \frac{\partial\sigma}{\partial C} \nabla C,$$

где h — толщина межфазного слоя жидкости; $\partial\sigma/\partial T$ и $\partial\sigma/\partial C$ — температурный и концентрационный коэффициенты поверхностного натяжения σ при температуре T и концентрации C ; η — динамическая вязкость жидкости; χ — температуропроводность; D — коэффициент поверхностной диффузии ПАВ.

Устойчивость пленки определяется величиной встречных потоков Марангони под действием градиентов поверхностного натяжения, вызванных неоднородной адсорбцией (Γ) молекул ПАВ на границе раздела фаз газ—жидкость и перепадом температуры ΔT соответственно:

$$\Delta\sigma_\Gamma = \left(\frac{\partial\sigma}{\partial\Gamma} \right)_{p,T} \Gamma,$$

$$\Delta\sigma_T = \left(\frac{\partial\sigma}{\partial T} \right)_p \Delta T.$$

Скорость переноса тепла выше, чем процесса диффузионного переноса массы: число Прандтля при решении тепловых задач по величине на 3 порядка меньше числа Шмидта в диффузионных задачах [19].

Анализ влияния величины отношения $M = \Delta\sigma_\Gamma/\Delta\sigma_T$ на концентрационно-капиллярный и термокапиллярный потоки приводит к следующему механизму флотации паровоздушной смесью.

При условии $M = \Delta\sigma_\Gamma/\Delta\sigma_T < 1$ устойчивое интенсивное тепловое течение Марангони полностью компенсирует его адсорбционную конвекцию. Движение медленно развивающегося концентрационно-капиллярного потока Марангони к центру межфазной пленки, стабилизирующее ее толщину, не может компенсировать ее утончение встречным термокапиллярным потоком от центра к периферии пленки с высоким потенциалом гидродинамической устойчивости.

Значения $M = \Delta\sigma_\Gamma/\Delta\sigma_T \geq 1$ характерны для флотационных систем с небольшим температурным напором и для аэрации пульпы теплоносителем с невысокой тепловой энергией — воздухом.

При $M = \Delta\sigma_\Gamma/\Delta\sigma_T > 1$ действие термокапиллярного течения Марангони полностью подавлено его концентрационно-конвективным течением, вызванным встречными касательными напряжениями.

При уменьшении значений $M = \Delta\sigma_\Gamma/\Delta\sigma_T \sim 1$ на поверхности пленки существует баланс встречных касательных напряжений и генерируемых ими теплого и концентрационного течений.

Таким образом, увеличению полноты извлечения частиц способствуют:

- увеличение сечения столкновения за счет радиальных колебаний стенок пузырька;
- присутствие локального источника тепла (пузырька пара) за счет утончения межфазной пленки термокапиллярным потоком Марангони;
- повышение скорости прилипания частиц к пузырьку пара за счет высокой скорости потери устойчивости смачивающей пленки, оцениваемой по времени индукции [20].

Притяжение между гидрофобными поверхностями (гидрофобное притяжение) и отталкивание между гидрофильными (структурное гидрофильное отталкивание) являются результатом отличия структуры воды в граничных слоях поверхностей («не-ДЛФО» сил) [21, 22].

Структура воды с повышением температуры изменяется [23]: уменьшается молярная доля соединенных водородными связями молекул, заполняются пустоты тетраэдрического каркаса несвязанными молекулами воды, водородная связь искажается у большей доли молекул, но больше в объеме, чем в защищенных поверхностью от теплового действия граничных слоях. Это приводит к росту сил гидрофобного притяжения и структурного гидрофильного отталкивания, что способствует высокой селективности флотации при аэрации пульпы паровоздушной смесью.

Из анализа механизма воздействия температуры на результат флотации и обуславливающих его факторов следует вывод о том, что энергетически затратный нагрев всего объема пульпы может быть заменен на нагрев воздуха (занимающего не более 12—15 % объема пульпы), используемого для аэрации пульпы при флотации.

Результаты исследований и их анализ

В течение промывочного сезона (160 дней) из каждых 1000 м³ галеэфельных отвалов с использованием винтовых сепараторов (с доводкой их

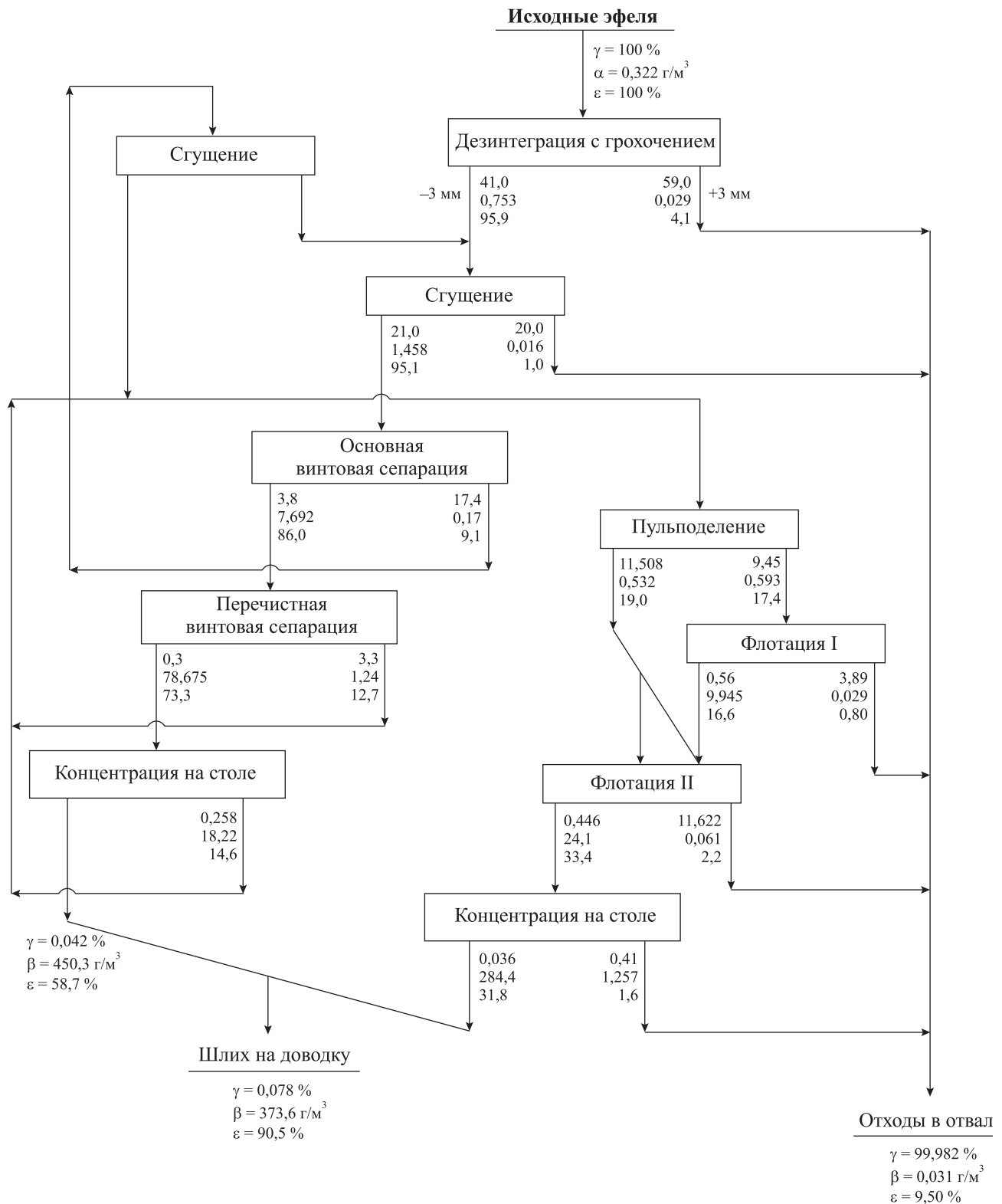


Рис. 4. Качественно-количественная схема, составленная по результатам опытно-промышленной переработки отходов россыпной золотодобычи

Fig. 4. Quality and quantity diagram prepared based on the pilot processing of placer mining waste

тяжелой фракции на концентрационных столах) извлекли 221 г золота. Капитальные затраты составили 278,5 руб. на 1 м³ годовой добычи песков, а операционные расходы — 531,1 руб./м³.

При доработке легкой фракции винтовой сепарации и концентрации на столах методом колонной флотации (см. рис. 4) извлечение золота из 1000 м³ галеефельных отвалов составляло 260 г.

При переходе с гравитационной на гравитационно-флотационную технологию обогащения галеефельных отвалов выход золотосодержащего концентрата увеличился с 0,047 до 0,103 %. С целью повышения извлечения в него золота флотацию проводили по схеме со смешением чернового концентрата (I струи флотации) и исходного питания (II струи флотации). В последнем случае в ка-

честве газовой фазы использовали смесь воздуха с водяным паром. Флотацию осуществляли смесью БТФ-163 (50—70 г/т) и ПМ-2 (2—5 г/т) производства ЗАО «Квадрат плюс» (г. Тольятти). При выходе концентрата 0,078 % с содержанием 373,6 г/м³ Au в него извлекали 90,5 % Au при снижении содержания золота в хвостах обогащения галеефельных отходов с 0,089 г/м³ (гравитационная технология обогащения) до 0,031 г/м³ (расчет).

Использовалась противоточная колонна ($D \times L = 0,6 \times 7,4$ м) с подачей исходного питания между зоной очистки (высотой 1,6 м) и зоной минерализации (5,8 м). Средняя в течение промывочного сезона производительность флотационной колонны по пульпе составила 0,64 м³/мин на 1 м² сечения камеры (при приведенной скорости пульпы 0,5—

Таблица 2. Денежные потоки

Table 2. Cash flows

Показатель	Суммарный денежный поток на конец периода, тыс. руб.	
	Гравитационная схема	Гравитационно-флотационная схема
Операционная деятельность		
Выручка от реализации продукции	858219	1131537
Расходы на материалы и комплектующие	620142	953778
Фонд оплаты труда	31536	34431
Налоги	90399	143328
Выплата процентов по кредитам	75764	112310
Итого	40378	127816
Инвестиционная деятельность		
Здания и сооружения	3756	5863
Оборудование и другие активы	120865	188655
Оборотный капитал	24924	38904
Разовый платеж за пользование недрами	16213	21378
ГГР, ТЭО, геологический отчет	27915	35369
НИОКР	39009	52095
Итого	232682	342264
Финансовая деятельность		
Поступление кредитов	216469	320886
Поступление акционерного капитала	0	0
Целевое финансирование	0	0
Лизинговые платежи	0	0
Выплата дивидендов	0	0
Итого	216469	320886
Суммарный дисконтированный денежный поток за период 5 лет	24165	106438

1,5 см/с). Разгрузку камерного продукта осуществляли эрлифтом при избыточном давлении воздуха $0,13 \pm 0,012$ МПа и расходе $0,045 \pm 0,002$ м³/мин на 1 м³. Целесообразность подачи промывной воды (в пределах $0,029—0,035$ м³/мин на 1 м³) не выявлена. Для подавления механического выноса нефлотируемых минералов в пенный продукт поддерживали определенный водный баланс колонны: расход воды в хвосты должен был превышать расход воды в питание на 5—10 %. За счет колебаний величины разжижения хвостов гравитации содержание твердого в питании флотации изменялось в пределах 30 ± 5 %.

На 1 м² сечения колонны на барботаж подавали 3,88 кг/мин пара с температурой 100—104 °С и давлением ~101 кПа и 1,05 м³/мин воздуха (0,33 кг/кг пара). Применяли электропарогенератор типа ЭПГ-50 (не подлежащий регистрации и не подконтрольный органам Ростехнадзора) и компрессор типа 4ВУ1-5/9. Вынесенный боковой аэратор конфузор-диффузорного типа был установлен на 147 мм выше разгрузки камерного продукта (дна флотационной колонны). Газосодержание в пульпе изменялось свободно в пределах 10—12 %.

Удельная производительность колонны по концентрату в среднем составила $2,8$ м³/(ч·м³) при расходе электроэнергии $0,3—0,4$ кВт/м³ пульпы.

Золотосодержащий концентрат перечищали до продукта (54707 г/м³ Au), пригодного для автономной пирометаллургической переработки. При бесколлекторной плавке получали золотосеребряный сплав аффинажной готовности (товарный продукт).

Удельные капитальные затраты при освоении техногенных отходов составили $434,7$ руб./м³, а операционные — $619,3$ руб./м³.

Из результатов сравнения технико-экономических показателей работы предприятия в течение 2 промывочных сезонов, отличающихся методами переработки техногенных отходов россыпной золотодобычи, следует, что при переходе с гравитационной на гравитационно-флотационную технологию срок окупаемости для дисконтированного денежного потока (DPP) уменьшается с 4,27 до 3,26 лет (при ставке дисконта $r = 15$ %), внутренняя норма рентабельности (PIR) увеличивается с 16,86 до 31,29 %, индекс прибыльности (PI) — с 1,04 до 1,17 и рентабельность EBITDA — с 31,4 до 42,5 %.

В табл. 2 приведены ожидаемые экономические показатели проекта по освоению отходов золотодобычи в течение 5 лет.

С учетом вероятности наступления указанных в табл. 2 событий (капитальные вложения и эксплуатационные затраты, цена на золото) при использовании гравитационно-флотационной технологии положительная величина суммарного дисконтированного денежного потока выше, чем в варианте гравитационной технологии, и этот факт следует учитывать при принятии инвестиционных решений.

Заключение

Для извлечения золота из отходов россыпной золотодобычи разработаны комплексы модульного типа первичного обогащения и доводки, обеспечивающие получение высоколиквидного товарного продукта в виде слитков лигатурного золота. Получение слитков повышает рентабельность малых золотодобывающих горных предприятий за счет сведения к минимуму ощутимой отрицательной аффинажной разницы при проведении окончательного расчета с аффинажным заводом.

Технологическая эффективность дополнения гравитационных методов извлечения золота флотационными выявлена в ходе опытно-промышленного освоения отходов россыпной золотодобычи. Результаты флотационной сепарации минералов будут выше, если содержание золота в операции основной флотации увеличивать за счет смешения исходного питания с черновым концентратом, а в качестве газовой фазы при флотации использовать паровоздушную смесь.

Выявлены механизм флотации паровоздушной смесью и обуславливающие его факторы, а также причины высокой эффективности процесса, анализ которых показал, что периодические радиальные колебания поверхности пузырька и термокапиллярное течение Марангони определяют уровень извлечения, а рост сил гидрофобного притяжения и структурного гидрофильного отталкивания приводит к высокой селективности процесса.

Основным эффектом от применения разработанной конфигурации схемы и режима флотации паровоздушной смесью является уменьшение выхода концентрата на ~25 отн.% при сохранении достигнутого уровня его извлечения и качества, что сокращает затраты на последующую его пиро- или гидрометаллургическую переработку.

Комбинированная гравитационно-флотаци-

онная технология обогащения техногенных россыпей золота с низкой извлекающей ценностью становится экономически оправданной: добавленная стоимость товарной продукции обеспечивает повышение величины чистого дисконтированного дохода и индекса рентабельности инвестиций, а также снижение срока их окупаемости.

Литература/References

1. Литвинцев В.С. Состояние и проблемы освоения россыпных месторождений благородных металлов. *Маркшейдерия и недропользование*. 2019. No. 5. С. 10—13.
Litvintsev V.S. State and problems of development of placer deposits of noble metals. *Marksheyderiya i nedropol'zovaniye*. 2019. No. 5. P. 10—13 (In Russ.).
2. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson concentrator separation performance: Pt. 1: Retained mass modeling. *Miner. Eng.* 2017. Vol. 112. P. 57—67.
3. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson concentrator separation performance: Pt. 2: Two-component feed separation modeling. *Miner. Eng.* 2017. Vol. 112. P. 114—124.
4. Ghaffari A., Farzanegan A. An investigation on laboratory Knelson concentrator separation performance: Pt. 3: Multi-component feed separation modeling. *Miner. Eng.* 2018. Vol. 122. P. 185—194.
5. Евдокимов В.С., Евдокимов С.И. Применение несмешивающихся разноплотных магнитных жидкостей в качестве среды разделения при магнитожидкостной сепарации. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. No. 2. С. 4—12. DOI: 10.17073/0021-3438-2017-2-4-12.
Evdokimov V.S., Evdokimov S.I. The use of immiscible magnetic fluids of different density as a separation medium in magnetic fluid separation. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya (Izvestiya. Nonferrous Metallurgy)*. 2017. No. 2. P. 4—12 (In Russ.).
6. Евдокимов С.И., Герасименко Т.Е. Выделение из продуктов обогащения россыпей шлихового золота методом магнитожидкостной сепарации. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2017. No. 5. С. 4—12. DOI: 10.17073/0021-3438-2017-5-4-12.
Evdokimov S.I., Gerasimenko T.E. Isolation of placer gold from dew enrichment products by the method of magnetic-liquid separation. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya (Izvestiya. Nonferrous Metallurgy)*. 2017. No. 5. P. 4—12 (In Russ.).
7. Панышин А.М., Евдокимов С.И., Солоденко А.А. Минералургия. Т. 1. Золото: Теория и промысел. Владикавказ: ООО НПКП «МАВР», 2010.
Panshin A.M., Evdokimov S.I., Solodenko A.A. Mineralurgy. Vol. 1. Gold: Theory and craft. Vladikavkaz: MAVR, 2010 (In Russ.).
8. Цыпин Е.Ф., Овчинникова Т.Ю., Ефремова Т.Ф. Эффективность применения рентгенофлуоресцентной сепарации для предварительной концентрации руд. *Горн. инф.-анал. бюлл.* 2020. No. 3-1. С. 431—442. DOI: 10.25018/0236-1493-2020-31-0-431-442.
Tsy-pin E.F., Ovchinnikova T.Yu., Efremova T.F. Efficiency of X-ray fluorescence separation for preliminary concentration of ores. *Gornyy informatsionno-analiticheskiy byulleten'*. 2020. No. 3-1. P. 431—442 (In Russ.).
9. Farrokhpay S., Filippov L., Fornasiero D. Pre-concentration of nickel in laterite ores using physical separation. *Miner. Eng.* 2019. Vol. 141. Art. 105892.
10. Самыгин В.Д. Кинетика минерализации пузырьков с учетом отрыва частиц и времени всплывания. *Известия вузов. Цветная металлургия*. 2016. No. 3. С. 4—11. DOI: 10.17073/0021-3438-2016-3-4-11.
Samygin V.D. Kinetics of bubble mineralization, taking into account the separation of particles and the time of floating. *Izvestiya vuzov. Tsvetnaya metallurgiya (Izvestiya. Nonferrous Metallurgy)*. 2016. No. 3. P. 4—11 (In Russ.).
11. Петушков В.А., Мельситов А.Н. Двухфазное паро-жидкостное течение в переходных режимах. *Математическое моделирование*. 2003. Т. 15. No. 10. С. 109—128.
Petushkov V.A., Melsitov A.N. Two-phase vapor-liquid flow in transient modes. *Matematicheskoye modelirovaniye*. 2003. Vol. 15. No. 10. P. 109—128 (In Russ.).
12. Тимофеев А.В., Стребнев Н.А. Трехмерное моделирование с помощью кода STAR-CD процессов локального кипения и конденсации теплоносителя в межтрубном пространстве активной зоны реакторов ВВЭР. *Вопросы атомной науки и техники. Сер.: Обеспечение безопасности АЭС*. 2012. No. 31. С. 31—41.
Timofeev A.V., Strebnev N.A. Three-dimensional modeling using the STAR-CD code of the processes of local boiling and condensation of the coolant in the inter-fuel space of the VVER reactor core. *Voprosy atomnoy nauki i tekhniki. Ser.: Obespecheniye bezopasnosti AES*. 2012. No. 31. P. 31—41 (In Russ.).
13. Лежнин С.И., Сорокин А.Л., Прибатурин Н.А. Эволюция давления и температуры при внезапном контакте холодной воды и насыщенного пара. *Тр. Ин-та механики УНЦ РАН*. 2007. Т. 5. С. 261—266.
Lezhnin S.I., Sorokin A.L., Pribaturin N.A. Evolution of pressure and temperature upon sudden contact of cold

- water and saturated steam. *Trudy Instituta mekhaniki UNTS RAN*. 2007. Vol. 5. P. 261—266 (In Russ.).
14. Коновалов В.В., Любимова Т.П. Численное исследование влияния вибраций на взаимодействие в ансамбле газовых пузырьков и твердых частиц в жидкости. *Вычислительная механика сплошных сред*. 2019. Т. 12. No. 1. С. 48—56.
Kononov V.V., Lyubimova T.P. Numerical study of the influence of vibrations on the interaction in an ensemble of gas bubbles and solid particles in a liquid. *Vychislitel'naya mekhanika sploshnykh sred*. 2019. Vol. 12. No. 1. P. 48—56 (In Russ.).
 15. Lyubimov D.V., Klimenko L.S., Lyubimova T.P., Filipov L.O. The interaction of a rising bubble and a particle in oscillating fluid. *J. Fluid Mechanics*. 2016. Vol. 807. P. 205—220.
 16. Mingalev S., Lyubimov D., Lyubimova T. Dynamics of particle confined between oscillating and fixed walls. *Microgravity Sci. Technol.* 2011. Vol. 23. No. 1. P. 99—103.
 17. Dukhin S.S., Kovalchuk V.I., Gochev G.G., Lotfi M., Miller R., Krzan M., Malysa K. Dynamics of rear stagnant cap formation at the surface of spherical bubbles rising in surfactant solutions at large Reynolds numbers under conditions of small Marangoni number and slow sorption kinetics. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2015. Vol. 222. P. 260—274.
 18. Gambaryan-Roisman T. Modulation of Marangoni convection in liquid films. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2015. Vol. 222. P. 319—331.
 19. Khafaji H.Q., Ekaid A.L., Terekhov V.I. Numerical study of direct evaporative air cooler forced laminar convection between parallel-plates channel with wetted walls. *J. Eng. Thermophys.* 2015. Vol. 24. No. 2. P. 113—122.
 20. Albijanic B., Subasinghe G.K.N., Bradshaw D.J., Nguyen A.V. Influence of liberation on bubble-particle attachment time in flotation. *Miner. Eng.* 2015. Vol. 74. P. 156—162.
 21. Guo H., Kovscek A.R. Investigation of the effects of ions on short-range non-DLFO forces at the calcite/brine interface and implications for low salinity oil-recovery processes. *J. Colloid Interface Sci.* 2019. Vol. 552. P. 295—311.
 22. Nikolov A., Wu P., Wasan D. Structure and stability of nanofluid films wetting solids: An overview. *Adv. Colloid Interface Sci.* 2019. Vol. 264. P. 1—10.
 23. Эйзенберг Д., Кауцман В. Структура и свойства воды. Л.: Гидрометеиздат, 1975.
Eisenberg D., Kautzman V. Structure and properties of water. Leningrad: Gidrometeoizdat, 1975 (In Russ.).